

УДК 621.891

Скрипник В.С., к.т.н.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ШКИВОВ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНОГО ТОРМОЗА ПРИ ИХ ВОЗДУШНО-ЖИДКОСТНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Аннотация. В материалах статьи рассмотрено оптимизационное проектирование составных шкивов ленточно-колодочного тормоза, приведен спроектированный тормозной шкив с принудительным воздушно-жидкостным охлаждением и наведен анализ эксплуатационных параметров усовершенствованных пар трения тормоза.

Анотація. У матеріалах статті розглянуто оптимізаційне проектування складених шківів стрічково-колодкового гальма, наведено спроектований гальмівний шків з примусовим повітряно-рідинним охолодженням і наведений аналіз експлуатаційних параметрів удосконалених пар тертя гальма.

Abstract. In the materials of the article we've considered the optimization design of composite pulleys of band-block brakes, we've designed brake pulley with forced air-liquid cooling and we've presented the analyses of operational parameters of improved friction pairs of the brake.

Введение. На тепловую эффективность работы составных шкивов существенно влияют процессы радиационного и сложного теплообмена (комбинаций конвективного, кондуктивного, испарительно-конденсационного), связанного с поверхностными и приповерхностными слоями пар трения трибосистемы и их телом (металлоемкостью). Правильный выбор площадей (матовых и полированной), т.е. охлаждения и нагревания при реализации тормозных режимов и при вынужденном воздушном охлаждении определяет энергонагруженность фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки в процессе его эксплуатации. Поэтому при проектировании составных шкивов необходимо обращать внимание на эффективность естественного и вынужденного воздушного, а также принудительного жидкостного охлаждения.

Состояние проблемы. Чтобы спроектировать сложную трибосистему, состоящую из тормозной ленты и шкива, и

находящимся между ними фрикционных накладок, которые рабочими и нерабочими поверхностями взаимодействуют с поверхностями металлическими элементами необходимо располагать базой данных не только внешних эксплуатационных параметров, но и внутренних, происходящих в приповерхностных слоях пары трения фрикционного узла. В тормозных устройствах металлический фрикционный элемент (тормозные шкивы, барабаны и диски), работающие в различных тепловых режимах, являются аккумуляторами энергии из-за из повышенной металлоемкости. Это обстоятельство способствует возникновению как поверхностных так и объемных температурных градиентов на и в теле металлических фрикционных элементов, и как следствие, возникновению больших термических напряжений. Неравномерность распределении последних на рабочей поверхности и вызывает возникновение микротрещин, влияющих на прочность металлических фрикционных элементов.

Известен метод определения конструктивных параметров металлических фрикционных элементов (тормозных: шкивов, барабанов и дисков), базирующийся на теории геометрического программирования [1]. Она включает в себя целевую функцию, которая минимизирует отрицательные факторы стоимости металлического фрикционного элемента и возникновения на его рабочей поверхности термических напряжений. Однако данный метод является неприемлемым для составных тормозных шкивов, косвенно принудительно охлаждаемых воздушно-жидкостной смесью из-за сложной настоящей задачи и поэтому обратились к аппарату нелинейного программирования, реализованный в модуле оптимизации на основе метода конечных элементов.

Постановка задачи. В данной публикации рассмотрены следующие вопросы применительно к решаемой проблеме:

- оценка энергетических уровней поверхностных и приповерхностных слоев пар трения тормоза;
- косвенное принудительное воздушно-жидкостное охлаждение матовых и полированных поверхностей составного шкива;
- проектирование составного шкива тормоза.

Цель работы – спроектировать составной шкив таким, чтобы на рабочей поверхности его обода не развивались температура выше допустимой для материалов фрикционной накладки при косвенном принудительном воздушно-жидкостном охлаждении пар трения тормоза при минимальном весе его тормозного шкива.

Оценка энергетических уровней поверхностных и приповерхностных слоев пар трения тормоза. Установлено, что величина отношения коэффициентов излучения матовой и полированной площадей равна отношению охлаждаемой к

нагреваемой поверхности тормозного шкива. В виде соотношения имеем [2, 3]

$$\frac{C_{лм}}{C_{лн}} = \frac{A_o}{A_n}. \quad (1)$$

Анализ соотношений (1) показывает следующее:

- отношение $C_{лм}/C_{лн}$ является величиной постоянной;
- отношение A_o/A_n является величиной переменной, поскольку с увеличением диаметра тормозного шкива происходит, в основном, увеличения его матовой поверхности при коэффициенте взаимного перекрытия ($k_{вз}$) равном 0,7 - 0,8;

- оценку составляющих A_o/A_n необходимо давать отдельно, т.е. охлаждаемую матовую поверхность шкива учитывать в процессах теплообмена через каждые его четыре оборота, охлаждаемую полированную поверхность беговой дорожки трения, учитывать в процессах теплообмена такое количество оборотов шкива без его одного оборота, который отвечает условному полному перекрытию фрикционными накладками беговой дорожки трения обода шкива.

Рассмотрим теплонагруженность металлополимерных пар трения при температурах ниже и выше допустимой для материалов фрикционной накладки.

До температуры ниже допустимой для материалов накладок пар трения тормоза преобладает, в основном, вынужденный конвективный теплообмен от поверхностей металлического фрикционного элемента. После превышения допустимой температуры для материалов накладок пар трения тормоза уже преобладает лучистый теплообмен (перенос теплоты осуществляется электромагнитными волнами). В это время происходит выгорание связующих компонентов из приповерхностных слоев накладок. Идущая термохимическая реакция с точки зрения энергетики является слабой, так как она носит эндотермический характер. Согласно электронно-ионной теории о двойном электрическом слое в это время формируются два двойных электрических слоя. Первый - на полированной поверхности металлического фрикционного элемента и рабочих поверхностях накладок. Второй слой охватывает рабочие поверхности фрикционных накладок (которые не взаимодействуют с полированной поверхностью металлического фрикционного элемента) и нижний уровень их подповерхностного слоя. В то же время на контактных поверхностях пар трения происходит непрерывное образование «жестких» и «мягких» окисных пленок, частично экранируемых взаимным массопереносом, и являющимися соединительными мостиками термоэлементов в микротермобатареях. При этом зарождается тепловое равновесие между металлическим фрикционным элементом и его крепежным выступом из-за перераспределения теплоты между ними на основе темпов нагревания.

Косвенное принудительное воздушно-жидкостное охлаждение матовых и полированных поверхностей составного шкива. Рассмотрим теплообменные процессы, наблюдаемые в серийных тормозных шкивах и в составных тормозных шкивах (усовершенствованных) согласно работы [4] при вынужденном воздушном охлаждении их поверхностей. Особенностью охлаждения является то, что в усовершенствованном тормозном шкиве площади матовых внутренних поверхностей системы воздушного охлаждения равны 25 % площадей матовых наружных поверхностей. При этом скорости омывающих потоков будут разными, а следовательно, количество омывающего воздуха наружные и внутренние матовые поверхности будет одинаковым.

Принудительное жидкостное охлаждение пар трения ленточно-колодочного тормоза имеет отличительную особенность в том, что при положении сверху камеры с жидкостью интенсифицируется радиационный теплообмен от полированной поверхности нижней части составного тормозного шкива. При положении снизу камеры с жидкостью радиационный теплообмен пропадает, поскольку указанная поверхность обода омывается жидкостью.

На основании системного анализа различных видов теплообмена серийного и усовершенствованного тормозного шкива и была предложена табл. 1, в которой и проиллюстрирована эффективность принудительного воздушно-жидкостного охлаждения составного шкива.

Анализ полученных результатов позволяет констатировать следующее:

- принудительное воздушное охлаждение обладает слабой эффективностью, но зато способствует росту градиента объемной температуры по толщине верхней и нижней части обода шкива, что вызывает интенсификацию радиационного теплообмена от нерабочей полированной поверхности составного шкива;

- кондуктивный теплообмен в сопряжениях «крепежный выступ шкива – фланец барабана» и «нижняя часть обода шкива – каркас камеры» способствует усилению принудительного воздушного охлаждения матовых и полированных поверхностей составного шкива;

- принудительное жидкостное охлаждение составного шкива является наиболее эффективным, поскольку термодинамическое состояние жидкости изменяется в зависимости от энергонагруженности шкива.

Для моделирования процессов воздушно-жидкостного охлаждения составного тормозного шкива буровой лебедки используем метод конечно-элементного моделирования с помощью программы Ansys Workbench.

Таблица 1 – Обозначение поверхностей, названия различных видов теплообмена и эффективность принудительного воздушно-жидкостного охлаждения составного шкива тормоза

Обозначение	Название поверхностей систем охлаждения:	Вид теплообмена	Эффективность в %	
			от	до
<i>вынужденное воздушное</i>				
А	полированная (рабочая) обода шкива	радиационно-конвективный	6,5	8,0
Б	матовая нерабочая обода шкива	конвективно-радиационный	5,0	6,5
В	матовые крепежного выступа обода шкива	конвективно-радиационный	1,0	2,0
Г	матовые реборд обода шкива	конвективно-радиационный	0,5	1,0
Д	матовые конических и цилиндрических отверстий обода шкива	радиационно-конвективный	0,25	0,5
Е	матовые кольцевых камер обода шкива	радиационно-конвективный	5,0	6,5
<i>кондуктивное (теплопроводностью)</i>				
Ё	матовые крепежного выступа обода шкива с фланцем барабана	кондуктивно-конвективный	2,0	5,0
Ж	матовые стенки жидкостной камеры с нижней частью обода шкива	кондуктивно-радиационный	3,0	6,0
<i>принудительное жидкостно-воздушное</i>				
З и И	полированной нерабочей обода шкива: через слой воздуха с жидкостью; с омываемой жидкостью	радиационно-конвективный;	10,0	20,0
		конвективный	15,0	25,0
Й	матовой камеры с омываемой жидкостью	конвективный	20,0	30,0
К	матовой наружной камеры с омывающим воздухом	радиационно-конвективный	5,0	10,0

На рис. 1 *а, б* представлено термограмму (*а*) и распределение тепловых потоков (*б*) в теле обода составного тормозного шкива ленточно-колодочного тормоза с принудительным воздушно-жидкостным охлаждением.

После рассмотрения термограмм и распределения тепловых потоков (рис. 1 *а, б*) следует отметить следующее:

- распределение температуры и как следствие температурных градиентов по толщине обода шкива происходит волнообразно сверху

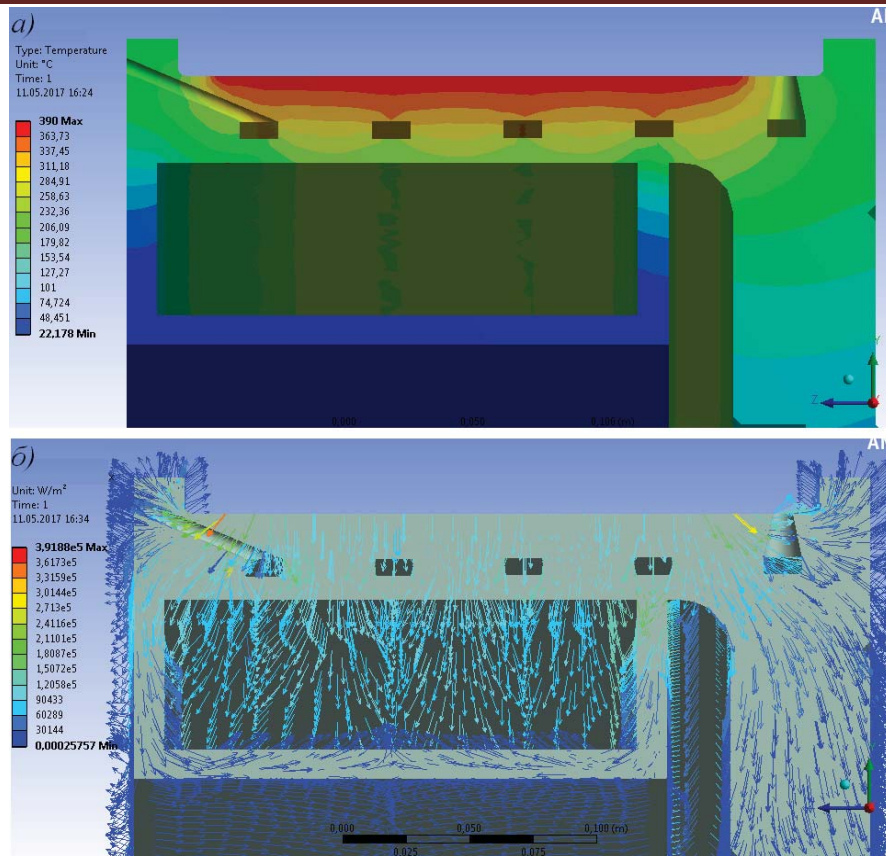


Рисунок 1 *a, б* – Термограмма (*a*) и распределение тепловых потоков (*б*) в теле обода тормозного шкива ленточно-колодочного тормоза с принудительным воздушно-жидкостным охлаждением

($4,4^{\circ}\text{C}/\text{мм}$) и снизу ($3,8^{\circ}\text{C}/\text{мм}$) благодаря наличию воздушных камер в ободе. Объясняется это следующим: поскольку коэффициент теплоотдачи конвективным охлаждением жидкостью намного выше чем воздухом, тепловые потоки интенсивно протекают между кольцевыми отверстиями по толщине обода к жидкостной камере, в которой и отводятся конвективно в циркулирующую жидкость (см. рис. 1 *б*), поэтому по толщине обода между воздушными кольцевыми камерами возникает большой градиент температуры ($4,14^{\circ}\text{C}/\text{мм}$). В этом случае воздух выступает в роли теплоизолятора между верхней и нижней частями обода, снижая при этом опасно большой градиент температуры по его толщине;

- по толщине обода шкива наблюдается зона прогрева возле заборного отверстия, в которой средняя температура составляет 170°C , и она на самом деле является меньшей вследствие действия конвективного охлаждения омывающим воздухом, который попадает в воздухозаборники и пронизывает весь обод (интенсивный теплоотвод, см. рис. 1 *б*). При этом часть теплоты перетекает кондуктивным

теплообменом в стенки камеры, в которой находится охлаждающая жидкость;

- температура циркулирующего потока воздуха в кольцевых объемах обода шкива увеличивается от свободного края к его заземлению, поскольку он нагревается от верхней составляющей обода шкива перегородок между его составляющими.

При рассмотрении состояния составного обода тормозного шкива от действия различных видов напряжений (от механических и тепловых нагрузок) следует обратить внимание на:

– максимальные механические напряжения (рис. 2 а) возникают на нерабочей полированной поверхности обода (243,6МПа) вследствие ее прогиба и растяжения от действия удельных нагрузок.

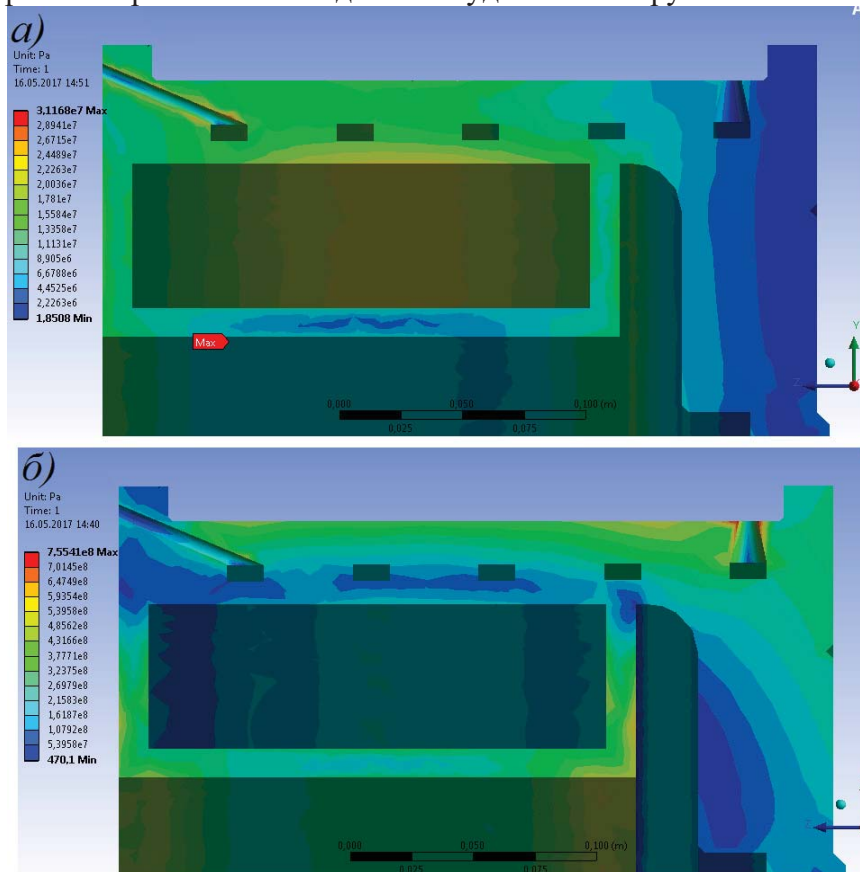


Рисунок 2 а, б – Моделирование напряжений: а – механических; б – температурных, развивающихся в обode тормозного шкива ленточно-колodочного тормоза с принудительным воздушно-жидкостным охлаждением

– заборные отверстия в сопряжении с первой камерой являются своего рода концентраторами напряжений, поэтому в их зоне также возникает очаг механических напряжений (зона III – 198,3МПа).

– большие температурные напряжения (рис. 2 б) наблюдаются в приповерхностных слоях обода шкива, и которые распространяются по ширине (507,4 МПа) обода вследствие его расширения;

– нерабочую поверхность обода над жидкостной камерой температурные напряжения в несколько раз ниже, поскольку происходит интенсивное конвективное жидкостное и радиационное охлаждение, что приводит к большому градиенту температурных напряжений по толщине обода шкива;

– при рассмотрении общей картины температурных напряжений, которые намного больше в правой части обода шкива возле крепежного выступа, поскольку жидкостная камера и заборные устройства для захвата холодного потока воздуха находятся в левой части обода;

– острые кромки стенок жидкостной камеры и диффузорные и конфузорные отверстия обода шкива являются концентраторами температурных напряжений, поэтому в указанных местах также наблюдаются повышенные температурные напряжения.

На основании вышеизложенного перейдем непосредственно к проектированию составного шкива тормоза.

Проектирование составного шкива тормоза. Для решения задач проектирования элементов фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза применяют аппарат нелинейного программирования, реализуемого в модуле оптимизации. Смысл последней заключается в нахождении таких величин конструктивных параметров (тормозного шкива и ленты, а также фрикционной накладки), при которых некоторая величина, именуемая целевой функцией, принимает экстремальное (максимальное или минимальное) значение. При этом ряд эксплуатационных и конструктивных параметров фрикционных узлов тормоза, находящихся в этом диапазоне, или функциональных зависимостей должны удовлетворять ограничением в виде равенств/неравенств. Оптимизационный алгоритм, который реализуется в Ansys Workbench, обладает универсальностью, достаточной для решения типовых задач, но в то же время содержит ряд особенностей, которые точно необходимо учесть. Блок-схема алгоритма проиллюстрирована на рис. 3.

С увеличением массы, в которой распределяется теплота, также увеличивается поверхность теплоотдачи обода тормозного шкива за счет теплорассеиваемой поверхности его боковых стенок. Поэтому выбор конструкции фрикционного узла производится в зависимости от требований к его габаритам, энергонагруженности поверхностных и приповерхностных слоев пар трения, допустимой удельной нагрузке на контакте, контактной жесткости элементов пары трения, развиваемого тормозного момента и допустимой поверхностной температуры для рабочих слоев полимерной накладки.

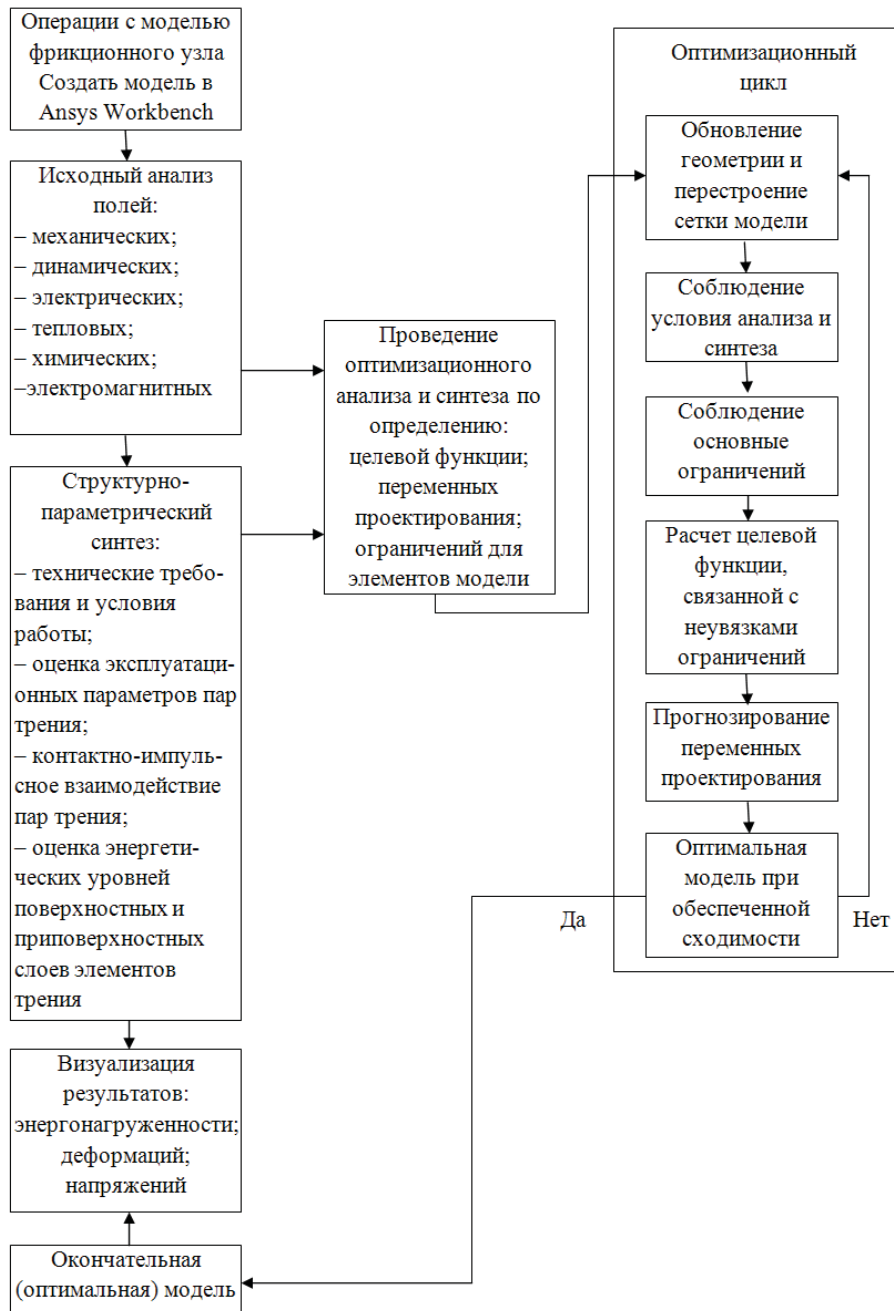


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма оптимизации конструктивных параметров фрикционного узла

При проектировании составного тормозного шкива задавались следующими ограничениями:

- температура поверхности трения составного тормозного шкива составляет 390°C;

- полированная площадь нижней части обода шкива должна составлять $2/3$ площади от поверхности трения верхней его части;
- внутренняя поверхность (матовая) кольцевых камер и отверстий между ними должна составлять 20-25% от наружных матовых поверхностей тормозного шкива. Эффективность воздушного охлаждения должна быть одинаковая за счет количества воздуха, попадающего во внутрь тормозного шкива;
- толщина верхней части шкива – 16,0-18,0 мм; нижней части – 8,0-10,0 мм; объем камеры с жидкостью должен обеспечить отвод количества теплоты не менее 30% при температуре 390°C;
- градиент температуры для верхней части шкива – до 25,0°C/мм; в перегородке камер – до 10,0°C/мм; через стенку камеры – до 50,0°C/мм.

На основании вышеизложенного на рис. 3 а, б, в представлен чертеж спроектированного составного тормозного шкива с жидкостной камерой. Следует отметить, что камера спроектирована без впускного и выпускного клапанов.

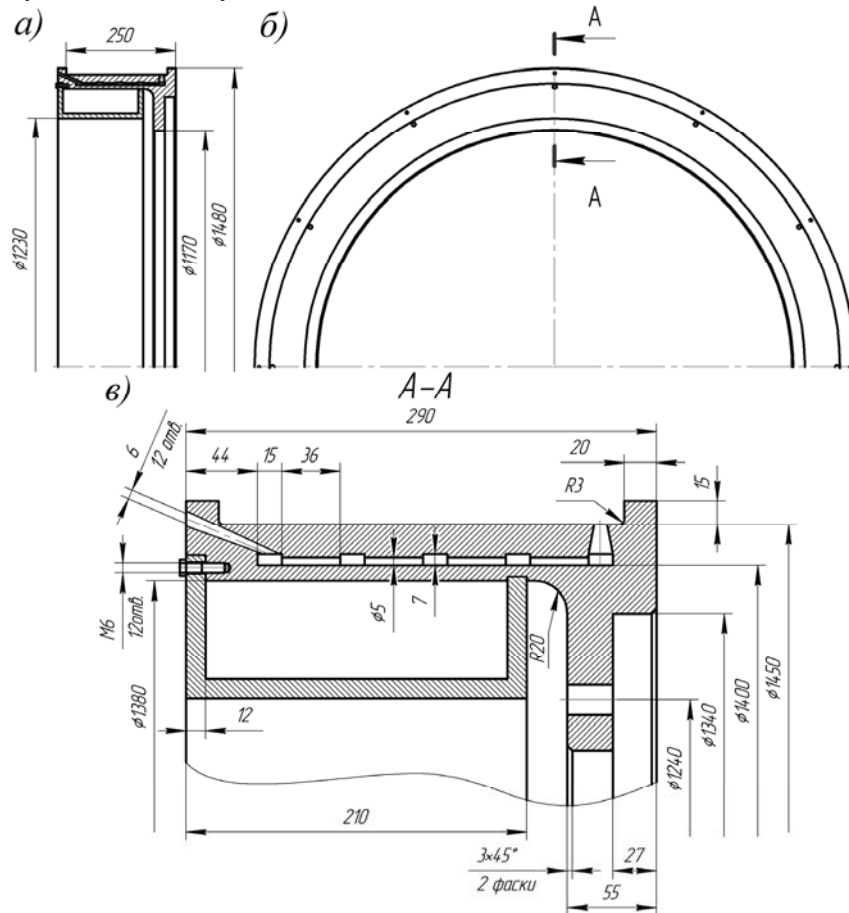


Рисунок 3 а, б, в – Спроектированный составной тормозной шкив буровой лебедки с жидкостной камерой

В табл. 2 приведены основные конструктивные и эксплуатационные параметры серийных и усовершенствованных пар трения ленточно-колодочных тормозов.

Таблица 2 – Основные эксплуатационные параметры серийных и усовершенствованных пар трения ленточно-колодочных тормозов

№ п/п	Эксплуатационные параметры	Пары трения ленточно-колодочного тормоза:		
		серийные	усовершенствованные	
1.	Вес тормозного шкива, кН: без камеры	4,744	4,508	
	с камерой без жидкости	-	5,849	
	с камерой и жидкостью	-	6,303	
2.	Момент инерции тормозного шкива, кг·м ² : без камеры	233,85	221,89	
	с камерой без жидкости	-	278,48	
	с камерой и жидкостью	-	298,58	
3.	Динамический коэффициент трения, f	0,33	0,38	
	стабильность, $\alpha_{ст} = f_{cp}/f_{max}$	0,90	0,926	
	Колебание, $\alpha_{к} = f_{min}/f_{max}$	0,79	0,83	
4.	Торможения: эффективность, $\beta_{эф} = \alpha_{ст}/\tau^2$, $1/c^2$	0,00625	0,00643	
	приведенная эффективность, $H_{эф.т.} = \alpha_{ст} / (\tau^2 \cdot \Delta g)$, $1/(c^2 \cdot \tau)$	$1,036 \cdot 10^{-2}$	$1,227 \cdot 10^{-2}$	
5.	Удельные нагрузки, p , МПа	1,2	1,2	
6.	Тормозной момент, M_T , кНм	174,3	200,7	
7.	Температуры и их градиенты, °С / (°С/мм)	шкива	составного шкива	
			верхней	нижней
			части	
	поверхностные;	390/1,2	390/1,8	390/1,9
	объемные	358/2,4	340/4,39	270/6,5
8.	Температурные напряжения и их градиенты, МПа / (МПа/мм)	796,85/4,61	406,56/9,24	189,79/3,04
9.	Износ накладок, Δg , г	60,3	52,4	

Проведенный системный анализ энергонагруженности при постоянных удельных нагрузках в парах трения серийного и усовершенствованного ленточно-колодочного тормоза (табл. 2) позволил констатировать следующее:

– разработанная конструкция составного тормозного шкива с принудительной воздушно-жидкостной системой охлаждения является

высокоэффективной (увеличился динамический коэффициент трения т тормозной момент на 13,1%) за счет работы материалов фрикционной накладки при поверхностных температурах ниже допустимой, т.е. 390°C, но при этом имело место увеличение веса и момента инерции составного тормозного шкива, соответственно, на 24,7% и 21,7% по сравнению с серийным тормозным шкивом;

– при одинаковой рабочей поверхностной температуре сравниваемых шкивов объемные температуры в верхней и нижней части составного шкива на 14,8% меньше, чем серийного шкива, но зато в первой конструкции наблюдались большие объемные температурные градиенты на 24,8%, нежели в серийном шкиве;

– весовой износ накладок меньший в усовершенствованных парах трения на 13,1%, нежели в серийных парах трения тормоза.

Выводы. Таким образом, рассмотрены особенности проектирования составных тормозных шкивов на основании тепловых аспектов его эффективности. Представлен спроектированный тормозной шкив с принудительным воздушно-жидкостным охлаждением в составе ленточно-колодочного тормоза и наведен анализ эксплуатационных параметров его пар трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, В. С. Скрыпник и др. – Баку: Апострофф, 2016. – 311 с.
2. Кириллин В.А. Основы экспериментальной термодинамики / В. А. Кириллин, А. Е. Шейдлин. – М. – Л: Государственное энергетическое издательство, 1950. - 310с.
3. Патент РФ №2279579С2, МПК F16D 65/813. Способ нагревания и охлаждения тормозных шкивов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок при оценке их теплового баланса / А. И. Вольченко, А. А. Петрик, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, П. Ф. Пургал, Л. И. Криштопа; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный технологический университет; заявл. 30.08.2004; опубл. 10.07.2006, Бюл. № 19. – 9с.
4. Нестационарный теплообмен / В. К. Кошкин, Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер и др. – М.: Машиностроение, 1973. – 328с.